

重庆雾的二维非定常数值模拟

张利民

李子华

(中科院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008) (南京气象学院, 南京 210044)

提 要

重庆是著名的“雾都”, 本文建立了一个复杂地形下详细考虑长波辐射冷却、地表热量平衡、雾水沉降、水汽凝结和蒸发、湍流交换系数等的二维非定常雾模式, 以实测资料为初始场, 研究了一次重庆雾的形成和发展过程, 对江河、热岛、辐射、地形和山城的影响, 模式分别进行了数值试验。

关键词: 雾; 江河; 山城。

一、引 言

重庆雾日较多, 雾造成的低能见度对工业生产、交通运输和旅游业等有严重影响, 并且雾能缩短日照时间、减弱到达地面的太阳辐射, 降低绿色植物光合作用, 影响农业增产丰收, 因此研究重庆雾十分必要。

Brown 等人^[1] 建立了一个雾模式来研究辐射雾的形成和发展, 但没有考虑环境动力的影响, 上边界只有 200m, 钱敏伟等^[2] 也建立了一个二维模式来研究雾且得到了一些重要的结论。

重庆市地形相当复杂, 多条山脉从东北向西南直贯全市, 市区地处长江、嘉陵江交汇的河谷丘陵地带, 本文建立了一个复杂地形下雾的二维模式来研究重庆雾的形成和发展, 利用实测资料作为初始场进行数值计算, 试验各个影响因子对雾的形成和发展的影响。

二、模 式 设 计

1. 基本方程

为了考虑重庆市复杂的地形, 我们引入转换坐标公式

$$Z^* = [(Z - Z_G) / (Z_H - Z_G)] \times Z_H,$$

基本方程组包括运动方程组、连续方程、热力方程、水汽方程和液水方程等^[3], 则

$$\frac{du}{dt} = -\theta \frac{\partial \pi}{\partial x} + g \frac{Z^* - Z_H}{Z_H} \frac{\partial Z_G}{\partial x} + K_H \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left(\frac{Z_H}{Z_H - Z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(K_m \frac{\partial u}{\partial Z^*} \right) + f_v,$$

$$\frac{dv}{dt} = -f(u - u_g) + K_H \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \left(\frac{Z_H}{Z_H - Z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(K_m \frac{\partial V}{\partial Z^*} \right)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial W^*}{\partial Z^*} - \frac{1}{Z_H - Z_G} \left(u \frac{\partial Z_G}{\partial x} \right) = 0,$$

$$\frac{d\theta}{dt} = K_H \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \left(\frac{Z_H}{Z_H - Z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial Z^*} \right) - \frac{Z_H}{Z_H - Z_G} \cdot \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial F_N}{\partial Z^*} + \frac{LF}{PC},$$

$$\frac{dq}{dt} = K_H \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \left(\frac{Z_H}{Z_H - Z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(k_q \frac{\partial q}{\partial Z^*} \right) - F,$$

$$\frac{dc}{dt} = K_H \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \left(\frac{Z_H}{Z_H - Z_G} \right)^2 \frac{\partial}{\partial Z^*} \left(K_c \frac{\partial c}{\partial Z^*} \right) + \left(\frac{Z_H}{Z_H - Z_G} \right) \frac{\partial G}{\partial Z^*} + F,$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_s}{\partial \zeta^2},$$

其中 Exner 函数 $\pi = C_p \left(\frac{P}{P_0} \right)^{k/c_p}$, $P_0 = 1000 \text{ hPa}$.

$$\frac{\partial \pi}{\partial Z^*} = - \left(\frac{Z_H - Z_G}{Z_H} \right) \times g / \theta.$$

Z^* 坐标下的垂直风速 W^* 为

$$W^* = \left(\frac{Z_H}{Z_H - Z_G} \right) \cdot W + \frac{Z^* - Z_H}{Z_H - Z_G} \left(u \frac{\partial Z_G}{\partial x} \right),$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + W^* \frac{\partial}{\partial Z^*}.$$

各个符号的定义在附录 A 中给出.

我们利用 McDonald^[4] 的方法来处理凝结项 F ; 重力沉降项定义为 $G = C \cdot \overline{V_i}$, 我们考虑 $\overline{V_i} = 1.9 \text{ cm/s}$, 见 Kunkel^[5]; 垂直交换系数的处理, 我们使用 Estoque^[6] 模式, 并且假设 $K_m = K_\theta = K_q = K_c$; 为了准确地计算长波辐射冷却, 我们采纳 Roach^[7] 的方法, 他把整个吸收波段分为 5 段, 考虑了水汽、二氧化碳和水滴的吸收; 夜间地表温度 T_s 借助于能量平衡方程而定; 水平交换系数定为 $50 \text{ m}^2/\text{s}$.

2. 差分方案

差分格式的选取对于数值模式的成功与否是至关重要的. 本文中时间差分采用前差格式, 平流项差分处理采用迎风显式格式, 水平扩散项采用显式中央差分格式, 垂直差分采用 Crank-Nicholson 方案, 它对于空间和时间具有二阶精度, 又无条件稳定. 时间步长取为 10s.

3. 边界条件

我们选择了一个冬季风盛行的剖面,且设计了一个 21×18 的二维网格,水平格距为 500m . 垂直方向上,我们使用变网格间距,第一层格距为 2m ,其它层以 1.4 倍增加.

底部边界条件: $Z^*=0$ 时, $u=v=0$, $\frac{\partial q}{\partial Z^*}=0$ (陆面), $q=q_r(TW)$ (水面), $\frac{\partial C}{\partial Z^*}=0$.

顶部边界条件: $Z^*=Z_H$ 时, $u=u_g$, $v=v_g$, $q=\text{常数}$, $c=0$, $\theta=\text{常数}$.

侧边界条件: $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0$.

4. 初始条件

在本模式设计的剖面上,商学院、珊瑚坝和红旗河沟三站设有气艇探空,市中的石板坡和枇杷山设有地面气象观测和雾的微结构观测,珊瑚坝还设有辐射平衡和热量平衡各分量观测,水温观测及雾的微结构观测. 取1月1日23时观测资料,经过适当扣值后,得到各网格点上的值,再经过模式适应后作为初始场,计算了这次雾的形成和发展.

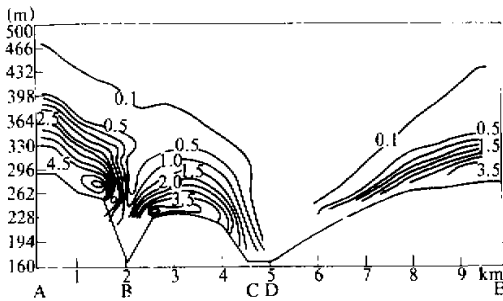


图1 1月2日4时37分液水混合比(0.1g/kg)

A —— 红旗河沟, B —— 嘉陵江, BC —— 市中心,
CD —— 长江(含珊瑚坝), E —— 商学院

三、几个数值实验

1. 实际条件下的模拟结果

如图1所示,在剖面左边雾的浓度和高度都是最大的,而在长江面雾浓度低,这和实际情况是相符的. 在实际观测中,我们在长江面上没有观测到雾. 从图2可以看到,在市中心和长江之间存在一个气流辐合上升区,而在剖面的两侧则存在气流辐散下沉区.

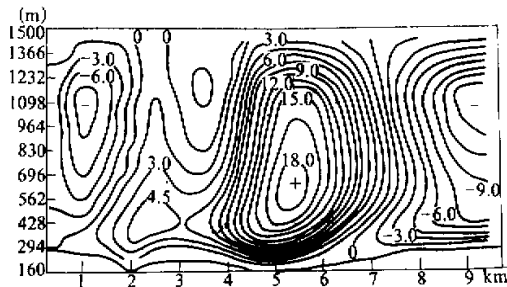


图2 1月2日4时37分垂直风场 (0.01m/s)

2. 河流对雾的影响

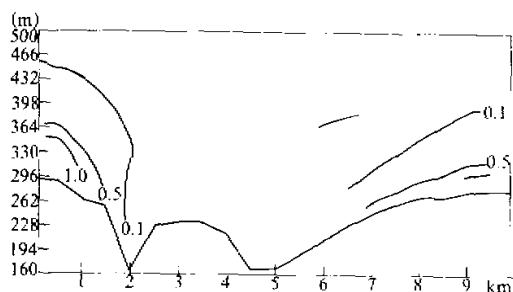


图3 1月2日4时37分液水混合比场 (不考虑河流 0.1g/kg)

假设在初始场和积分过程中不考虑河流的影响且假设为一平地, 从图3可知, 在长江与嘉陵江所在地之间没有雾形成, 雾主要分布在剖面的两侧. 与图1比较, 不考虑河流影响时, 雾的高度、宽度和浓度均少于正常模拟结果.

3. 长波辐射冷却对雾的影响

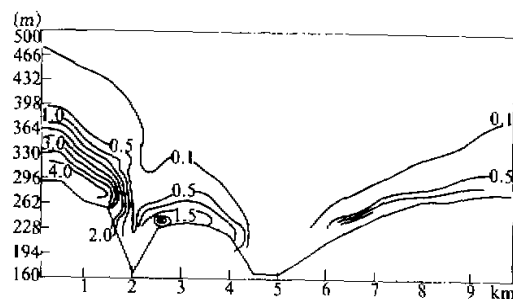


图4 1月2日4时37分液水混合比场 (不考虑长波辐射冷却 0.1g/kg)

假设在数值模拟过程中不考虑长波辐射冷却的影响, 比较图1与图4, 我们发现, 雾厚度和浓度均明显减少. 这表明, 长波辐射冷却对雾的发展起着重要的作用.

4. 城市热岛对雾的影响

假如不考虑城市热岛的存在, 在市中心区上雾的浓度增加 (见图5), 且雾在长江上空出

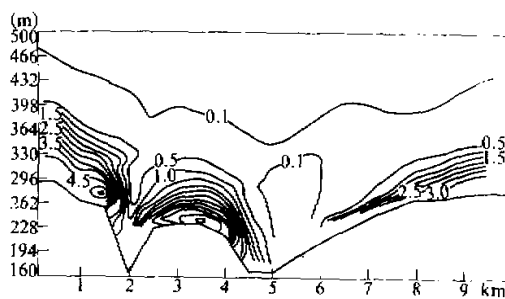


图5 1月2日4时37分液水混合比场 (不考虑热岛 0.1g/kg)

现. 这些结果表明: 热岛对雾的影响有二重性, 一方面, 热岛环流可以增强市中心区与

长江之间的气流辐合,把水汽从低层带入高层,有利于雾的发展.另一方面,城市上空空气温度较高又不利于雾的发展.

5. 地形对雾的影响

假设整个剖面地形是平坦的,我们做了两个不同的实验,一个考虑河流,另一个不考虑河流.我们发现,假如平坦地形下不考虑河流影响时,在整个剖面上没有雾.在实际地形下不考虑河流影响时,雾出现在剖面的两侧.假如平坦地形下有河流存在时,雾的厚度和浓度均减少(与图1比较).我们可以得出结论:山风环流对雾的形成和发展起着重要的作用,它可以抬升暖湿空气,且使之向四周扩散,并且与山脉下泄冷空气混合,有利于雾的发展.

6. 山城(市中区)对雾的影响

假设市中区是一块平地且与两江等高.我们发现,图6在剖面两侧形成的雾明显在浓度和高度上均低于正常模拟结果,且在整个峡谷中无雾形成.这说明山城的存在对雾的形成是有利的.

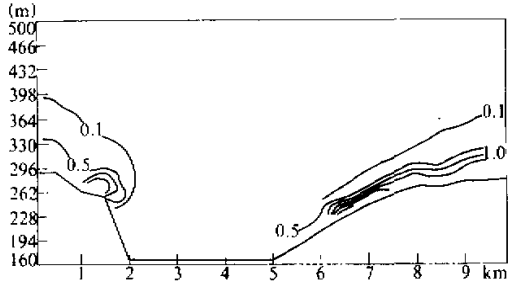


图6 1月2日4时37分液水混合比场(不考虑山城 0.1g/kg)

四、结 论

通过对一次典型重庆雾的模拟和实验,我们得出一些初步的结论:

- 1. 河流的存在对整个剖面上雾的形成和发展是十分重要的.
- 2. 长波辐射冷却可以增加雾的浓度和高度.
- 3. 城市热岛可以增强辐合,但它的高温又不利于雾在市区上空形成.
- 4. 围绕城市的山脉对雾的形成和发展起了十分重要的作用.
- 5. 山城的存在有利于雾的形成.

致谢: 本文是在导师王鹏飞教授指导下完成的,成文过程中,曾得到南京大学许绍祖副教授、中国科学院大气物理研究所雷孝恩研究员的有益帮助,在此一并表示谢意.

附录文中符号代表的量

α 土壤热导率	P_0 1000 hPa 气压
c 液水混合比	q 水汽混合比
c_p 定压比热	T_s 土壤温度
f 科里奥利参数	u, v, w 速度分量
F 单位质量空气凝结项	W^* 垂直坐标 (Z^*) 下速度分量
F_N 净辐射通量	x, z 坐标
g 重力加速度	Z^* 转换坐标下高度
G 液水的重力沉降通量	Z_G 地面高度
K_H 水平交换系数	Z_H 模式顶高度
k_m, k_d, k_q, k_i 垂直交换系数	θ 位温
L 潜热	ρ 空气密度
P 气压	

参 考 文 献

- [1] Brown, R. and W. T. Roach, 1976. The physics of radiation fog: II a numerical study. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, **102**, 335 — 354.
- [2] 钱敏伟、雷孝恩, 1990. 长江上空辐射雾的数值研究, *大气科学*, **14** (4), 483 — 489.
- [3] Pielke R. A. 著, 张杏珍、杨长新译, 1990. 中尺度气象模拟, 124 — 133.
- [4] McDonald, J. E., 1963. The saturation adjustment in numerical modelling of Fog. *J. Atmos. Sci.*, **20**, 476 — 478.
- [5] Kunkel, B. A., 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models. *J. Appl. meteor.*, **23**, 34 — 41.
- [6] Estoque, M. A. and C. M. Bhumralkar, 1969. Flow over a local heat source. *Mon. wea. Rev.*, **97**, 850 — 859.
- [7] Roach, W. T. and A. Slingo, 1979. A high resolution infrared radiative transfer Scheme to study the interaction of radiation with cloud. *Quart. j. Rof. meteor. Soc.*, **105**, 603 — 614.

A Two-Dimensional Time-integral Numerical Model of Chongqing Fog

Zhang Limin

(Nanjing Geography and Linnology Institute, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210044)

Li Zhihua

(Nanjing Meteorology Institute)

Abstract

Chongqing is a famous "fog metropolis", we have set up a model for complex terrain considering in details the long-wave radiative cooling, surface heat budget, gravitational settling, saturation adjustment and turbulent exchange coefficient etc. We used the observed data as initial field to simulate the process of the formation and development of fog in Chongqing. Finally, the numerical experiments are made separately including rivers, thermal island, long-wave radiation, terrain and mountain city.

Key words: Fog; Rivers; Mountain city.